

## 真性半導体のPhotoelectromagnetic効果

著者	石亀 希男
号	52
発行年	1964
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/23165">http://hdl.handle.net/10097/23165</a>

氏 名・(本籍)	いし    かめ    まれ    お 石    亀    希    男
学 位 の 種 類	理    学    博    士
学 位 記 番 号	理    第    5    2    号
学位授与年月日	昭和 3 9 年 9 月 1 6 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 2 項該当
最    終    学    歴	昭和 3 5 年 3 月 東北大学大学院理学研究科修士課程修了
学位論文題目	真性半導体の Photoelectromagnetic 効果
論文審査委員	(主査) 教授 桜    井    武    麿    教授 袋    井    忠    夫 教授 上    田    正    康 教授 平    原    栄    治

## 論 文 目 次

第一章	緒    論
第二章	理論の概要
第三章	Si の PEM 効果
第四章	Ge の PEM 効果
第五章	Te の PEM 効果
第六章	結    論

## 論 文 内 容 要 旨

### 第一章 緒 論

Photoelectromagnetic (PEM) 効果は、光の吸収により結晶内に作られた電子と正孔の拡散流に、磁場が作用した場合に生ずるものである。この効果は Kikoin と Noskov<sup>(1)</sup>らにより 1934 年はじめて見いだされた。現在では、Ge, PbS, InSb, CdS, Cu<sub>2</sub>O などの半導体結晶について見いだされているが、その温度依存性、磁場依存性、波長依存性、光量依存性などに関しては InSb と Ge について 2~3 報告されているにすぎない。

著者は、真性半導体である Si, Ge, Te などの PEM 効果を実験的に研究し、その磁場依存性、光量依存性、温度依存性、波長依存性などについてしらべた。更に同一の試料を用いて光電導効果をもしらべ、その結果と PEM 効果の結果とを比較検討した。

### 第二章 理論の概要

PEM 効果に関する理論について現象論的な拡散の方程式から出発して PEM 効果を取り扱うものと、古典的な運動方程式から出発し、relaxation time を導入して PEM 効果を導くやり方などを述べ、第三章以下の実験結果と比較するのに便利な表現を与えている。

### 第三章 Si の PEM 効果

Si の PEM 効果は、Bulliard<sup>(2)</sup>が 1954 年に 1.2 micron よりも短い波長の光を用いて測定を行ない、ただその効果のあることのみを報告しているが、その光量依存性、温度依存性、波長依存性などに関してはほとんど報告がない。

著者は、不純物として朋素を含む比抵抗が 800 ohm cm と 426 ohm cm の P 型の Si 単結晶を用いて PEM 効果をしらべた。

まず光量依存性については、0.9 micron の波長の光を用い、1000 gauss の磁場を作用させた場合の依存性を 300 °K でしらべ、 $2 \times 10^{13}$  quanta / cm<sup>2</sup> sec よりも光量が増大すると PEM 電圧は光量に比例しなくなることを見いだした。

次に PEM 効果の温度依存性については、 $2 \times 10^{13}$  quanta / cm<sup>2</sup> sec の光量を用い、1000 gauss の磁場を作用させて、200 °K から 450 °K までの温度領域で測定を行ない、高い温度領域では温度の低下と共に PEM 効果は急激に増大するが、350 °K よりも温度が低下すると温度の低下と共に減少することを見だし、この温度依存性から excess minority carrier の寿命の温度依存性を導いた。その結果から、常温以下では Si の禁制帯の中心よりわずか下方に再結合中心が存在することがあきらかとなった。

PEM 効果の波長依存性については、excess minority carrier の濃度勾配による拡散という過程を含む PEM 効果と、この過程を含まない光電導効果との波長依存性を同じ試料を用いて測定比較し、carrier の表面での再結合と結晶内での再結合とを、ふたつの効果の mechanism のちがいをもとにしてしらべている。その結果、光電導効果の方が PEM 効果よりも長波長側まで感度を有することが見いだされ、又固有吸収端よりも短い波長領域では、PEM 効果は波長が短くなるにつれて増大するが、光電導効果の場合には波長が短くなるにつれて減少することが見いだされた。これらの波長依存性のちがいから、excess minority carrier の濃度勾配の変化が PEM 効果の場合には極めて大きく作用していることがわかった。

## 第四章 Ge の P E M 効果

Ge の P E M 効果は Hall<sup>(3)</sup> や Bulliard<sup>(2)</sup> によりしらべられたが更に Moss<sup>(4)</sup> らによつて光量依存性・波長依存性などがしらべられた。又最近 Goldstein<sup>(5)</sup> らによりその温度依存性がしらべられている。

著者は、これまでの研究であまり注意されていなかった表面の処理に特に注意を払い、不純物の量がわずかに異なる場合、これが P E M 効果にどのように影響するかを磁場依存性、光量依存性、温度依存性、波長依存性などからしらべた。

不純物の量が  $7 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  と  $8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  の 2 個の Ge を試料として用い、試料の照射面を ( | | ) 方向に定め、etch pit の大きさを金属顕微鏡でしらべて、ふたつの試料の pit の幾何学的な形状がひとしくなるように注意した。

まず磁場依存性は、300°K と 223°K の温度でしらべ、磁場の小さい領域では linearity が成立するが、磁場の増大と共に linearity がわるくなり、更にふたつの試料の P E M 電圧は 300°K で同じ値をもつが、223°K の場合には異なる値をもつことが見いだされた。

光量依存性は、 $10^{14} \sim 10^{16} \text{ quanta / cm}^2 \text{ sec}$  の光量領域で種々の温度の場合について測定した。P E M 電圧は、温度が高い場合光量に比例して変化するが、温度が低い場合には光量の増大と共に比例しなくなる。Moss らは 300°K でのみ Ge の光量依存性を測定しているが、上述の 300°K での光量依存性は Moss<sup>(4)</sup> らの結果によく一致している。

温度依存性は 200°K から 400°K 附近の温度領域でしらべた。この結果から寿命の温度依存性が導かれ、 $E_t - E_v \approx 0.35 \text{ eV}$  とすると、Shockley - Read<sup>(6)</sup> の式によく一致することを見いだした。Goldstein<sup>(5)</sup> らは  $E_t - E_v \approx 0.32 \text{ eV}$  を得ているが、この実験により得られた再結合中心は Goldstein らの中心よりも上方にある。

次に P E M 効果の波長依存性を光電導効果と共にしらべた。その結果、固有吸収端において感度が最大値の  $\frac{1}{2}$  になる波長は P E M 効果と光電導効果とは異なり  $\lambda_{\text{PEM}}(\frac{1}{2}) < \lambda_{\text{pc}}(\frac{1}{2})$  であることを見いだした。更に、光電導効果の場合には固有吸収端に peak が存在するが P E M 効果には存在しないことを見いだした。この実験で得られた  $\lambda_{\text{PEM}}(\frac{1}{2})$  は Moss の結果と誤差の範囲内で一致している。

## 第五章 Te の P E M 効果

Te の P E M 効果は現在のところ簡単な磁場依存性の測定が報告されているだけであつて、その他の性質については殆んど報告がない。光電導効果の温度依存性から見ると、低い温度で寿命が大きくなり、このことから直接再結合の過程が Redfield<sup>(7)</sup> により提唱されているが、それにとまらぬ発光が認められず、excess minority carrier の再結合機構に関してはいろいろな説がある。

著者は P E M 効果と光電導効果とを同一試料を用いてしらべた。

まず、磁場依存性に対し表面がどのような影響をおよぼすかをしらべるために、表面を光学研磨した試料と光学研磨した後腐蝕した試料とを用いて磁場依存性をしらべた。その結果、表面を腐蝕したものは 3500 gauss まで磁場に対する比例関係が成立するが、光学研磨のみを行なつた試料では 2500 gauss までしか比例関係が成立しないことがあきらかにされた。

光量依存性は、腐蝕した試料を用い、3000 gauss の磁場と 2.5 micron の波長の光を用いて測定を行なつた。その結果、光量が  $10^{14} \sim 10^{16} \text{ quanta / cm}^2 \text{ sec}$  の範囲で P E M 電圧が光量に比例して変化するを見いだした。

P E M 効果と光電導効果の温度依存性は、同一の試料を用い、 $3 \times 10^{15} \text{ quanta / cm}^2 \text{ sec}$  の光量と 3000 gauss の磁場を用いて測定を行なつた。その結果、常温よりも温度が低下すると P E M 効果も光電導効果も増大するが、200°K よりも温度が低下すると、光電導効果は更に増大するが、P E M 効果は逆に減少することを見いだした。更に、これらふたつの効果の温度依存性から導かれる各々

の場合の寿命  $\tau_{PEM}$  と  $\tau_{PG}$  の温度依存性をしらべ、これらの値から電子と正孔の寿命を分離して導いた。その結果、電子の寿命は温度の低下と共に減少するが、正孔の寿命は 200°K 以下では温度の低下と共に逆に増加することを見いだした。ここで得られた電子と正孔の寿命の温度依存性から、200°K 以下の温度では電子の trapping が生じていて、再結合はこの trapping center を通して生じているものと説明される。

次に PEM 効果の波長依存性について測定を行なつた。PEM 効果は  $T_e$  の固有吸収帯でのみ生じ、感度は波長の増大と共に増大するが、3.75 micron よりも長い波長領域では感度は急激に減少する。この場合、 $\lambda_{PEM}(\lambda)$  は 3.8 micron で、 $T_e$  0.33 eV に対応している。更に、偏光を用いた場合の分光感度をしらべ、偏光の方向が結晶の  $O$  軸に平行 ( $O//$ ) な場合には  $\lambda_{PEM}(\lambda) = 3.4 \text{ micron}$  となり、 $O$  軸に直角 ( $O\perp$ ) の場合には  $\lambda_{PEM}(\lambda) = 3.7 \text{ micron}$  となることを見いだした。これら偏光方向のちがひによる波長依存性のちがひは、光吸収の測定において見いだされた  $T_e$  の結晶の異方性にもとづく固有吸収端の差に極めてよく一致している。

## 第六章 結 論

第三章から第四章にわたる実験結果をまとめ、種々の真性半導体における PEM 効果の磁場依存性、光量依存性、温度依存性、波長依存性などを総合的に論じている。

### 文

### 献

- (1) I. K. Kikoin and M. M. Noskov, Phys. Z. Sowjet., 5, 586, 1934
- (2) H. Bulliard, Phys. Rev., 94, 1564, 1954
- (3) L. H. Hall, Phys. Rev., 97, 1471, 1955
- (4) T. S. Moss, L. Pincherle and A. M. Woodward, Proc. Phys. Soc. Lond., B66 743, 1953
- (5) S. Goldstein, H. Mette and W. W. Gärtner, Advances in Semiconductors, PP. 78, 1959
- (6) W. Shockley and W. T. Read, Phys. Rev., 87, 835, 1952
- (7) D. Redfield, Photoconductivity Conference, PP. 566, 1956

## 論 文 審 査 要 旨

Photoelectromagnetic (P E M) 効果は磁場の中に置かれた半導体結晶の表面に光を照射すると、磁場及び光の方向に垂直な方向に電位差の生ずる現象で、数種の半導体について観測されているが、そのくわしい特性についてはあまり報告されていない。本論文は真性半導体である比較的純粋なシリコン、ゲルマニウム、テルルの P E M 効果の実験的研究で、そのおのおのについて、磁場依存性、温度依存性、波長依存性、光量依存性などの特性をしらべると共に、同一試料を用いて光電導効果を測定し、それらの結果を理論と結びつけて論議している。

まずシリコンについては、従来この効果の存在のみが報告されているだけであるから著者の与えた諸特性は価値あるものと認めてよい。温度依存性の結果から P E M 電流にあづかる担体の寿命の温度に対する関係がえられ、これによつて禁制帯の中心より僅か下方に再結合中心の存在することが推論された。更に P E M 効果と光電導効果の波長依存性の結果を比較し、その差を担体の濃度勾配に結びつけて解釈している。

次にゲルマニウムの P E M 効果についてはその特性の 2 ～ 3 について既に報告されているが、試料の表面についてあまり注意が払われなかつた。著者はこの効果が担体の表面再結合に影響を受ける事実鑑み、2 種類の試料の表面を同じ条件になるよう注意深く処理し実験を行なつた。温度依存性の結果から再結合中心の位置を与え、又その分光感度と光電導の分光感度との差異に対して理論的解釈を行なつている。

テルルについては従来簡単な磁場依存性が報告されているだけであるから、著者の観測した諸特性は新しい事実で、特に偏光を用いて分光感度の微細構造を与えている点は高く評価してよい。更に P E M 効果と光電導の温度依存性の結果から、両効果における担体の寿命と温度との関係を求め、これから電子と正孔の寿命の温度による変化を分離して求めた。電子と正孔は  $200^{\circ}\text{K}$  以下では異なつた寿命を示し、これから、この温度領域において、電子のトラップが生じていることを推論している。

以上本論文のシリコン、ゲルマニウム、テルルの P E M 効果の研究は、実験方法においても信頼性があり、えられた実験結果は従来えられていなかった多くの新しい事実を呈示したのみならず、更に同一試料について光電導を合せて測定し、これらの結果を理論と結びつけることによつて、結晶内部の担体の動きについて知識を与えたことは、半導体の研究に寄与するものと思われる。よつて石亀希男提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。